

## 实验 20 双光栅微弱振动位移的测量

### 引言

双光栅微弱振动位移的测量是一种把机械位移信号转化为光电信号的手段，光栅式位移测量技术在长度与角度的数字化测量、运动比较测量、数控机床、应力分析等领域得到广泛的应用。主要用于力学实验中作音叉振动分析、微弱振幅（位移）测量和光拍研究等。测绘出外力驱动音叉时的谐振曲线。用光学手段研究力学问题，是一个力、光、电综合性很强的实验。

### 实验目的

1. 熟悉一种利用光的多普勒频移形成光拍的原理，掌握精确测量微弱振动位移的方法。
2. 作出外力驱动音叉时的谐振曲线。
3. 分析影响音叉谐振曲线的因素。

### 实验原理

#### 1. 位相光栅的多普勒频移

多普勒效应是指光源、接收器、传播介质或之间反射器之间的相对运动引起的接收接收到的光波频率发生变化，这种现象称多普勒频移效应。

当激光平面波垂直入射到位相光栅时，由于位相光栅上不同的光密和光疏媒质部分对光波的位相延迟作用，使入射的平面波变成出射时的褶曲波阵面，见图 2，由于衍射干涉作用，在远场，我们可以用大家熟知的光栅方程即（1）式来表示：

$$d \sin \theta = n \lambda \quad (1)$$

式中  $d$  为光栅常数， $\theta$  为衍射角， $\lambda$  为光波波长。

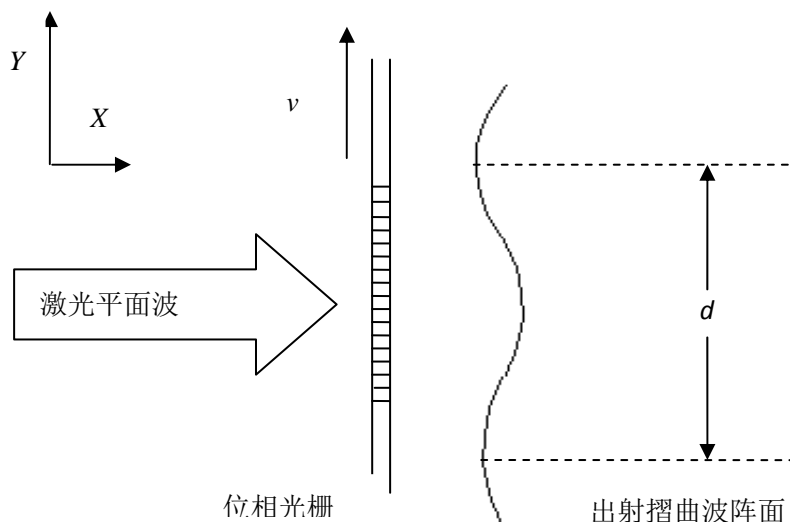


图 2

然而,如果由于光栅在  $y$  方向以速度  $v$  移动着,则出射波阵面也以速度  $v$  在  $y$  方向移动。从而,在不同时刻,对应于同一级的衍射光线,它的波阵面上出发点,在  $y$  方向也有一个  $vt$  的位移量,见图 3。

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

这个位移量相应于光波位相的变化量为  $\Delta\phi(t)$ 。

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta s = \frac{2\pi}{\lambda} v_t \sin \theta \quad (2)$$

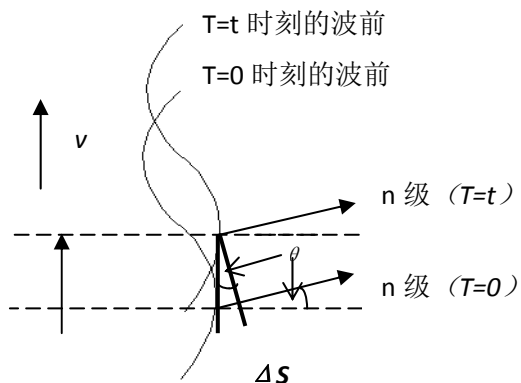


图 3

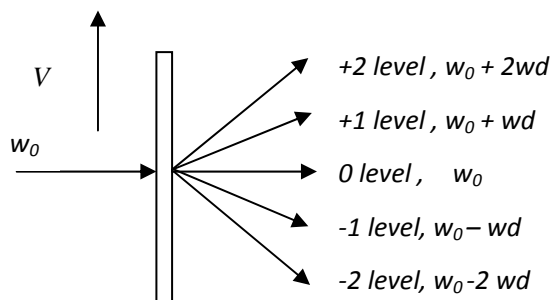


图 4

(1) 代入 (2) :

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t) &= \frac{2\pi}{\lambda} v_t \frac{n\lambda}{d} \\ &= n2\pi \frac{v}{d} t = n\omega_a t \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\omega_a = 2\pi \frac{v}{d}$

现把光波写成如下形式：

$$\begin{aligned}
 E &= E_0 \exp[i(\omega_0 t + \Delta\phi(t))] \\
 &= E_0 \exp\{i(\omega_0 + n\omega_d)t\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

显然可见，移动的位相光栅的  $n$  级衍射光波，相对于静止的位相光栅有一个：

$$\omega_a = \omega_0 + n\omega_d \tag{5}$$

的多普勒频率，如图 4 所示

## 2. 光拍的获得与检测

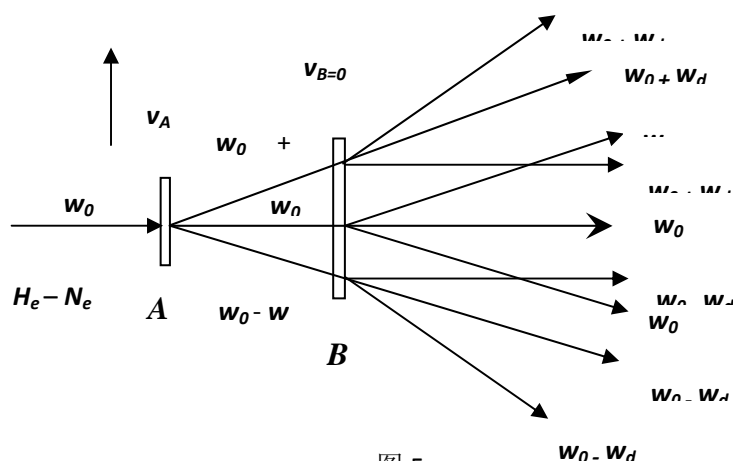


图 5

光频率甚高为了要从光频  $\omega_0$  中检测出多普勒频移量，必须采用“拍”的方法。即要把已频移的和未频移的光束互相平行迭加，以形成光拍。本实验形成光拍的方法是采用两片完全相同的光栅平行紧贴，一片 **B** 静止，另一片 **A** 相对移动。激光通过双光栅后所形成的衍射光，即为两种以上光束的平行迭加。如图 5 所示，光栅 **A** 按速度  $v_A$  移动起频移作用，而光栅 **B** 静止不动只起衍射作用，故通过双光栅后出射的衍射光包含了两种以上不同频率而又平行的光束，由于双光栅紧贴，激光束具有一定宽度故该光束能平行迭加，这样直接而又简单地形成了光拍。当此光拍讯号进入光电检测器，由于检测器的平方律检波性质，其输出光电流可由下述关系求得：

$$\text{光束 1: } E_1 = E_{10} \cos(\omega_0 t + \phi_1)$$

$$\text{光束 2: } E_2 = E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2] \quad (\text{取 } n=1)$$

$$\text{光电流: } I = \xi(E_1 + E_2)^2 \quad (\xi \text{ 为光电转换常数})$$

$$= \xi \left\{ \begin{array}{l} E_{10}^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_1) \\ + E_{20}^2 \cos^2(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2 \\ + E_{10}E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \\ + E_{10}E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_0 + \omega_d)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] \end{array} \right\} \quad (6)$$

因光波频率  $\omega_0$  甚高，不能为光电检测器反应，所以光电检测器只能反应 (6) 式中第三项拍频讯号：

$$i_s = \xi \{ E_{10}E_{20} \cos[\omega_d t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \}$$

光电检测器能测到的光拍讯号的频率为拍频

$$F_{\text{拍}} = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{v_A}{d} = v_A n_\theta \quad (7)$$

其  $n_\theta = \frac{1}{d}$  为光栅密度，本实验  $n_\theta = 100$  条/mm

### 3. 微弱振动位移量的检测

从 (7) 式可知， $F_{\text{拍}}$  与光频率  $\omega_0$  无关，且当光栅密度  $n_\theta$  为常数时，只正比于光栅移动速度  $v_A$ ，如果把光栅粘在音叉上，则  $v_A$  是周期性变化的。所以光拍信号频率  $F_{\text{拍}}$  也是随时间而变化的，微弱振动的位移振幅为：

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{F_{\text{拍}}(t)}{n_\theta} dt \\ &= \frac{1}{2n_\theta} \int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt \end{aligned}$$

式中  $T$  为音叉振动周期， $\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$  可直接在示波器的荧光屏上计算波形数而得到，因为

$$\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$$

表示  $T/2$  内的波的个数，其不足一个完整波形的首数及尾数，需在波群的两端，可按反正弦函数折算为波形的分数部份，即

$$\text{波形数} = \text{整数波形数} + \frac{\sin^{-1} a}{360^\circ} + \frac{\sin^{-1} b}{360^\circ}$$

式中， $a$ 、 $b$  为波群的首尾幅度和该处完整波形的振幅之比。（波群指  $T/2$  内的波形，分数波形数包括满  $1/2$  个波形为  $0.5$  满  $1/4$  个波形为  $0.25$ 。）

### 实验仪器

双光栅微弱振动测量仪、数字示波器

双光栅微弱振动测量仪，其面板结构如图 1 所示。

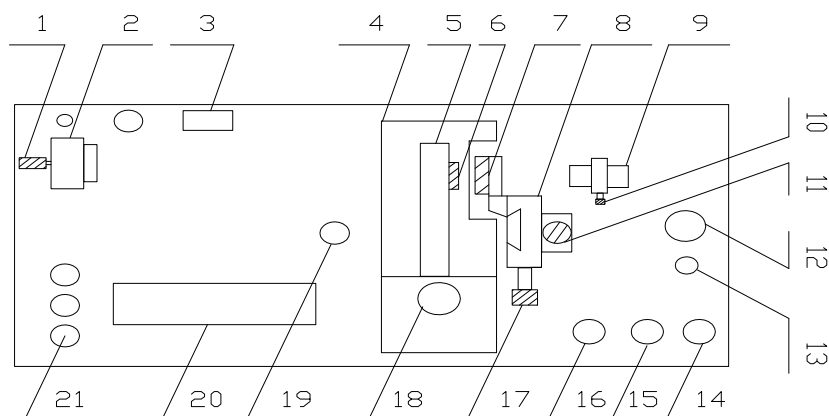


图 5

图 1 中，1—光电池升降调节手轮，2—光电池座，在顶部有光电池盒，盒前有一小孔光阑，3—电源开关，4—音叉座，5—音叉，6—动光栅（粘在音叉上的光栅），7—静光栅（固定在调节架上），8—静光栅调节架，9—半导体激光器，10—激光器升降调节手轮，11—调节架左右调节止紧螺钉，12—激光器输出功率调节，13—耳机插孔，14—音量调节，15—信号发生器输出功率调节，16—信号发生器频率调节，17—静光栅调节架升降调节手轮，18—驱动音叉用的蜂鸣器，19—蜂鸣器电源插孔，20—频率显示窗口，21—三个信号输出插口，Y1 拍频信号，Y2 音叉驱动信号，X 为示波器提供“外触发”扫描信号，可使示波器上的波形稳定。

### 实验内容

## 1. 线路连接

将双踪示波器的 Y1、Y2、X 外触发输入端接至双光栅微弱振动测量仪的 Y1、Y2(音叉激振信号, 使用单踪示波器时此信号空置)、X (音叉激振驱动信号整形形成方波, 作示波器“外触发”信号) 的输出插座上, 示波器的触发方式置于“外触发”; Y1 的 V/格置于 0.1V/格—0.5V/格; “时基”置于 0.2ms/格; 开启各自的电源。

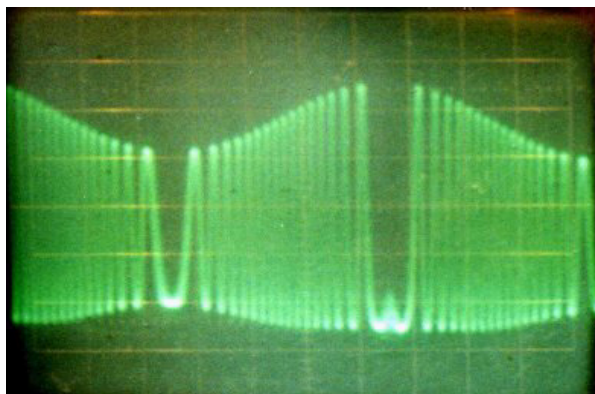


图 6: 单踪示波器显示的拍频波

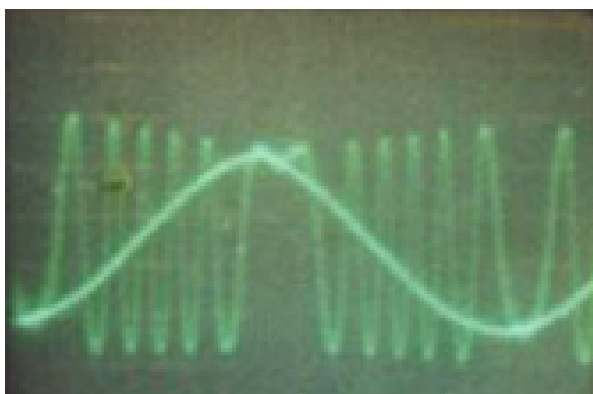


图 7: 双踪示波器显示的拍频波和音叉驱动波

## 2. 操作

### (1) 几何光路调整

小心取下“静光栅架”(不可擦伤光栅), 微调半导体激光器的左右、俯昂调节手轮, 让光束从安装静止光栅架的孔中心通过。调节光电池架手轮, 让某一级衍射光正好落入光电池前的小孔内。锁紧激光器。

### (2) 双光栅调整

小心地装上“静光栅架”静光栅尽可能与动光栅接近(不可相碰!)用一屏放于光电池架处, 慢慢转动光栅架, 务必仔细观察调节, 使得二个光束尽可能重合。去掉观察屏, 轻轻敲击音叉, 在示波器上应看到拍频波。注意: 如看不到拍频波, 激光器的功率减小一些试试。在半导体激光器的电源进线处有一只电位器, 转动电位器即可调节激光器的功率。过大的激光器功率照射在光电池上将使光电池“饱和”而无信号输出。

### (3) 音叉谐振调节

先将“功率”旋钮置于 6--7 点钟附近, 调节“频率”旋钮, (500 Hz 附近), 使音叉谐振。调节时用手轻轻地按音叉顶部, 找出调节方向。如音叉谐振太强烈, 将“功率”旋钮向小钟点方向转动, 使在示波器上看到的 T/2 内光拍的波数为 10~20 个左右较合适。

#### (4) 波形调节

光路粗调完成后,就可以看到一些拍频波,但欲获得光滑细腻的波形,还须作些仔细的反复调节。稍稍松开固定静光栅架的手轮,试着微微转动光栅架,改善动光栅衍射光斑与静光栅衍射光斑的重合度,看看波形有否改善;在两光栅产生的衍射光斑重合区域中,不是每一点都能产生拍频波,所以光斑正中心对准光电池上的小孔时,并不一定都能产生好的波形,有时光斑的边缘即能产生好的波形,可以微调光电池架或激光器的 X-Y 微调手轮,改变一下光斑在光电池上的位置,看看波形有否改善。

#### (5) 测出外力驱动音叉时的谐振曲线

固定“功率”旋钮位置,小心调节“频率”旋钮,作出音叉的频率—振幅曲线。

(6) 改变音叉的有效质量,研究谐振曲线的变化趋势,并说明原因。(改变质量可用橡皮泥或在音叉上吸一小块磁铁。注意,此时信号输出功率不能变)。将橡皮泥粘在音叉上,改变音叉的有效质量,通过调节“微调”旋钮,研究此时的谐振曲线的变化规律。

(7) 在第(6)步之后,改变橡皮泥的质量及放置的位置,研究谐振曲线随其变化规律。可以通过此方法来初步测定微小物理的质量。

#### 注意事项:

- 1、实验中要求动光栅和静光栅调成平行。
- 2、调节频率旋钮是应该非常细心,谐振曲线在很小的频率范围之内。

#### 思考题

1. 在动光栅前、后加偏振片对实验结果会有怎么的影响?是分析之。
2. 作外力驱动音叉谐振曲线时,为什么要固定信号功率?
3. 如何判断动光栅与静光栅的刻痕已平行?
4. 该实验对音叉的振动频率有什么要求?作出解释
5. 若此实验在晚上进行,会发现接收到的拍频波不稳定,为什么?应该怎么解决?
6. 本实验测量方法有何优点?测量微振动位移的灵敏度是多少?

#### 参考资料

1. 杨选民、冯壁华等,南京大学《普通物理实验讲义—激光双光栅法则微小位移》
2. 易明等,《南京大学学报》,1984年4期,《几种位相光栅的移频效应》